

하이브리드시스템 모델링 기반 발전기 전력시스템 안정화장치 정수선정 기법

Parameter Selection Method for Power System Stabilizer of a Power Plant based on Hybrid System Modeling

백 승 목*
(Seung-Mook Baek)

Abstract - The paper describes the parameter tuning of power system stabilizer (PSS) for a power plant based on hybrid system modeling. The existing tuning method based on bode plot and root locus is well applied to keep power system stable. However, due to linearization of power system and an assumption that the parameter ratio of the lead-lag compensator in PSS is fixed, the results cannot guarantee the optimal performances to damp out low-frequency oscillation. Therefore, in this paper, hybrid system modeling, which has a DAIS (differential-algebraic-impulsive-switched) structure, is applied to conduct nonlinear modeling for power system and find optimal parameter set of the PSS. The performances of the proposed method are carried out by time domain simulation with a single machine connected to infinite bus (SMIB) system.

Key Words : Low-frequency oscillation, Hybrid system modeling, Nonlinearity, Parameter tuning, Power system stabilizer

1. 서 론

전력계통은 전력수요의 증가와 다양한 전력설비들의 계통 연계를 통해 점차 규모가 커지고 있으며, 송전선로를 중부하로 인해 계통의 안정도 여유가 점점 줄어들고 있다. 따라서 대부분의 발전기들은 속응성 여자시스템을 이용하여 계통의 동기화 토크를 증가시켜 과도 안정도를 향상시키고 있다 [1]-[2]. 하지만, 이와 같은 속응성 여자시스템은 계통의 댐핑 토크를 저하시킬 가능성이 있어서 국내에서는 500 MW 급 이상의 대형 발전기에는 전력시스템 안정화장치(Power System Stabilizer, 이하 PSS)의 설치를 규정에 두고 있다. PSS는 계통의 과도 현상시에 댐핑토크를 향상시키기 위해 속응성 여자시스템에 보조신호를 주어 발전기 단자전압을 조절하는 역할을 한다. 이와 같은 보조신호는 그 크기는 작지만 발전기 회전자 속도의 위상과 동상인 전기적 토크를 발생하여 저주파 진동을 감쇠시키는 역할을 한다[3]. PSS의 중요성에 따라 국내에서는 성능시험을 5년 주기로 수행하는 것을 규정으로 하고 있으며, 한국전력공사 전력연구원에서도 이와 같은 성능시험을 수행하고 있다.

기존의 PSS 정수선정 기법으로 PSS를 포함한 전력시스템을 선형화하여 블록다이어그램을 이용한 선형과라미터 선정하는 방법을 사용하고 있다. 다시 말해서, PSS의 위상보상기의 정수를 선정하기 위해서는 보테선도를 사용하여 위

상지연이 되지 않도록 하는 정수를 선정하며, 이득 정수는 근 궤적법을 이용하여 최적값을 선정하는 방법을 사용하고 있다. 이와 같은 방법의 단점은 위상보상기의 정수비를 고정하고 정수를 찾게 되어 최적값을 구하기 어렵다는 것과 위상보상기의 정수를 구한 후, 고유치를 분석하여 이득 정수를 구하므로 위상보상기의 정수와 이득정수에 대한 최적값을 동시에 찾을 수 없다는 것이다[3]-[4].

한편, 하이브리드시스템은 최근 들어 많은 물리적 시스템(연속적 다이내믹, 이산사건의 다이내믹, 스위치 동작, 점프 현상이 혼합되어 있는 시스템)의 연구에서 주목을 받고 새로운 제어 기법이다[5][6]. 특히, 전력시스템의 경우도 미분방정식, 대수적방정식 뿐 만 아니라 리미터에 의한 이산방정식, 변압기 탭 변화에 대한 스위칭 동작 등의 비선형 동적특성을 나타내므로 하이브리드시스템의 범주에 속하게 된다. 이와 같이 하이브리드시스템 모델링이 가능한 전력시스템의 모델링을 위해서 현재 개발된 가장 적합한 모델링은 DAIS(differential-algebraic-impulsive-switched) 구조[7]의 하이브리드시스템 모델링 기술이다. DAIS 모델은 비선형 전력시스템의 비선형적 동적특성을 고려하여 미분방정식, 대수적방정식, 임펄스 및 스위치 형태의 이산방정식으로 표현하는 방법이다. 이와 같은 방법은 전력시스템을 수학적으로 정밀 모델링을 수행할 수 있으며, 미분방정식과 대수적방정식을 이용하여 전력시스템의 동적 특성에 대한 궤도민감도를 계산하거나, 민감도를 통한 시스템 행렬을 계산할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 DAIS 구조로 전력시스템을 모델링하여 발전기의 PSS 정수를 선정하는 기술을 제안한다. 이와 같은 방법의 장점은 비선형모델을 선형화하지 않고, 최적 정수를 선정하기 때문에 그 결과의 신뢰성이 높을 뿐만 아니라, 기

* Corresponding Author : Division of Electrical, Electronic, and Control Engineering, Kongju National University, Korea

E-mail : smbak@kongju.ac.kr

Received : June 17, 2014; Accepted : July 29, 2014

존 방법에서 가지고 있는 단점을 극복하고 최적의 정수를 선정하여 전력계통 안정도를 향상시키는 장점이 있다. 본 논문에서 제안하는 방법을 PSS를 포함한 1기 무한모선 시스템에 외란을 인가함으로써 성능을 평가하고자 한다.

2. 전력시스템 안정화 장치

2.1 전력시스템 안정화 장치 역할 및 구조

일반적으로 전력계통의 동기화 토크를 손상시키지 않고 댐핑 토크를 제공하기 위해 여자시스템에 보조 제어장치가 요구되는데 이런 장치를 PSS라고 한다[8]. 이 PSS의 출력 신호는 계통에서 발생하는 저주파 진동을 감쇠시키는 역할을 하며, 저주파 진동은 0.1~2[Hz] 대역의 주파수를 갖는다. 또한, 저주파 진동 모드 광역진동모드와 지역진동모드로 구분할 수 있으며 지역진동모드는 0.8~2[Hz] 대역의 주파수를 갖으며 광역진동모드는 상대적으로 작은 주파수를 갖는다[9]. 그림 1은 전력계통에서 제어기의 특성을 파악하기 위한 기본 모델인 1기 무한모선 계통을 나타낸다. 참고로 그림 1에서와 같이 1기 무한모선을 이용하여 PSS의 성능을 분석하는 방법은 지역진동모드의 저주파 진동을 감쇠하는 것이 목표이다. 그림 1에서 발전기(G)에는 2축(d-q) 각각에 2개의 감쇠권선을 갖고 있는 6차 모델을 적용하였다[10]. 이 모델에 대한 발전기 파라미터 및 전송선로에 대한 데이터는 참고문헌 [10]에 제시되어 있다. PSS 제어기를 포함한 전압조정기/여자기 모델을 그림 1에서와 같이 발전기(G)에 연결하였다.

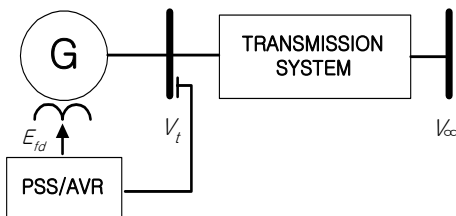


그림 1 1기 무한모선 계통
Fig. 1 Single machine connected to infinite bus system

그림 2는 이번 연구에서 최적화 기법을 적용할 PSS 모델에 대한 다이어그램이며 전압조정기/여자기에 보정신호(V_{pss})를 인가한다. IEEEEST PSS와 같은 일반적인 PSS 모델은 계통의 주파수 편차($\Delta\omega$)를 입력으로 받으며, 이득정수와 두 개의 위상보상기를 포함하고 있으며 그 출력을 여자시스템의 보조신호로 인가한다. 이 보조신호가 전력계통의 저주파 댐핑 향상에 중요한 역할을 하며, 그에 따라 PSS의 파라미터 최적화는 전력계통의 안정도 향상을 위해 결정적인 역할을 한다.

그림 2의 PSS는 총 5개의 제어기로 구성되어 있으며, 각각 이득제어기, 저주파대역필터, 고주파대역필터, 그리고 2개의 위상보상기이다. 또한, 그림 2에서, $\Delta\omega$ 는 PSS에 입력되는 각주파수의 변동분을 의미하고, K_1 은 이득정수이며, T_L 은 저주파 대역 필터 정수로서 PSS의 제어 대상 주파수가 0.8~2.0[Hz] 대역이므로 일반적으로 0.01의 값을 적용한다.

또한, T_W 는 고주파대역필터 정수로서 신호의 DC요소를 제거하기 위해서 사용되며 10의 값을 일반적으로 사용한다. 본 논문에서 목표를 하고 있는 대상은 저주파 진동 감쇠에 가장 큰 영향을 미치는 이득정수(K_1) 및 위상보상정수($T_1 \sim T_4$)이다. 그리고 x_L, x_w, x_p 및 x_k 는 PSS의 각 제어기를 미분방정식으로 표현했을 때의 변수를 의미하고, v_{in}, v_w, v_p 및 v_{out} 은 각 제어기의 출력값을 변수로 표현한 것이다. 이와 같은 방법으로 AVR의 변수를 지정할 수 있으며, 본 논문에서 AVR의 변수에 대한 설명은 생략한다.

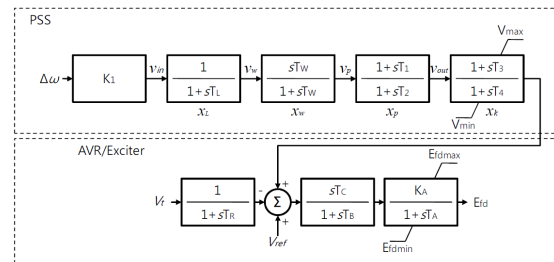


그림 2 PSS와 전압조정기/여자기(AVR/Exciter) 모델
Fig. 2 PSS and AVR/Exciter

2.2 전력시스템 안정화 장치 튜닝 기술

PSS의 튜닝기술은 두 가지 절차로 나뉜다. 첫 번째 절차는 위상보상 시정수를 구하는 것이고, 두 번째 절차는 위상보상 시정수를 적용한 후 이득정수를 구하는 것이다. 위상보상 시정수는 PSS 정수 튜닝에서 가장 중요한 부분이며, 여자기 기준점과 발전기 공극 토크 사이에서 발생하는 위상 지연을 보상하는 것을 목적으로 한다. 일반적으로 PSS는 그림 2에서와 같이 2 개의 위상보상기를 갖으며, 그림 2의 $T_1 \sim T_4$ 의 정수값을 결정하는 것이 중요하다. 첫 번째 절차에서 위상보상 시정수를 선정하는 방법은 아래와 같다[3]-[4].

- 그림 1의 1기 무한모선을 선형화하여 전달함수 계산
- 보테선도를 이용해 PSS가 없을 때 위상지연을 계산
- PSS를 투입하여 지역모드 진동 주파수대를 중심으로 최대 위상보상이 이뤄질 수 있도록 시정수 결정 (이 때, $T_1/T_2 = T_3/T_4 = 10$ 을 유지)

두 번째 절차에서 이득정수는 근 궤적법을 통해서 구하게 되는데, 위에서 결정한 위상보상 시정수를 적용한 후, 이득정수를 변화시키면서 시스템이 불안정해지는 이득정수를 우선 구한 후에 그 값의 1/3을 이득정수로 구하여 결정한다. 기존의 PSS 시정수 선정에 관한 자세한 내용은 참고문헌[3] 참고하기 바란다.

이와 같은 방법을 통해 구해진 시정수는 실제 현장에 적용했을 때, 계통의 안정도를 향상시키는데 기여하는 것을 확인할 수 있으나, 전력계통을 선형화하여 분석하는 것, 위상보상 시정수의 비를 10으로 정하는 것, 그리고 위상보상 시정수를 고정한 후에 이득정수를 구하는 것에 의해서 최종 선정된 시정수는 최적화된 값으로 볼 수 없다는 단점이 있다. 본 논문에서는 이와 같은 단점을 극복하고 안정성이 높

은 시정수를 선정하는 방법으로 하이브리드시스템 모델링 기반 PSS 시정수 선정 방법을 제안한다.

3. 하이브리드시스템 모델링

3.1 하이브리드시스템 모델링 소개

서론에서 언급한 것과 같이 하이브리드시스템은 선형 및 비선형 특성이 복합적으로 나타나는 시스템을 의미한다. 즉, 선형 및 비선형 특성을 일관된 모델링 기법으로 구현하여 그 상호작용에 대한 해석을 가능하게 하는 시스템이다. 특히, 전력계통을 모델링한 하이브리드시스템은 다음과 같은 선형 및 비선형 특성 그리고 이산적인 스위칭 사건이 복합적으로 상호작용을 하는 시스템을 말한다[11].

- 연속적인, 이산적인 상태변수
- 연속적인 동적 특성
- 사건에 따른 이산적인 상태변수의 변화에 대한 도식화

위에 제시된 특성을 포함하는 대표적인 하이브리드 시스템은 하이브리드 동적 시스템을 $H = [Q, \Sigma, A, G]$ 로 정의한 참고문헌 [11]에 제시되어 있다.

위에 제시된 모델은 일반적인 하이브리드시스템을 나타내고 있으며, 이번 연구에서 적용하려는 수치적 최적화 방법을 적용하기 위한 모델링에는 적합하지 않다. 왜냐하면 이번 연구에서 하이브리드 시스템 모델링을 사용하는 목적은 최적화 알고리즘에 필요한 1차 도함수를 보다 쉽고 정확하게 계산하는 것이기 때문이다. [7]에서 제시된 DAIS 구조로 모델링된 하이브리드시스템은 전력시스템의 비선형 동작 특성을 나타내는데 적합하며, 궤도민감도 분석 기반 시스템 모델링을 계산하여 고유치분석을 수행하는데 효과적이다.

$$\dot{x} = f(x, y) \tag{1}$$

$$0 = g(x, y) \tag{2}$$

$$0 = \begin{cases} g^{(i-)}(x, y) & y_{d,i} < 0, \\ g^{(i+)}(x, y) & y_{d,i} > 0, \end{cases} \quad i=1, \dots, d \tag{3}$$

$$z^+ = h_j(x^-, y^-) \quad y_{e,j} = 0, \quad j \in \{1, \dots, e\} \tag{4}$$

$$x = \begin{bmatrix} x \\ z \\ \lambda \end{bmatrix}, \quad \underline{f} = \begin{bmatrix} f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \underline{h}_j = \begin{bmatrix} x \\ h_j \\ \lambda \end{bmatrix},$$

$$x \in X \subseteq \mathbb{R}^n, y \in Y \subseteq \mathbb{R}^m, z \in Z \subseteq \mathbb{R}^l, \lambda \in L \subseteq \mathbb{R}^p,$$

- x ; 전력각, 각속도, 자속과 같은 연속 변수
- z ; 변압기 탭의 위치와 같은 이산 변수
- y ; 단자전압, 단자각과 같은 대수적 변수
- λ ; 변압기 리액턴스, 제어기 이득값, 스위칭 시간, 리미터 값과 같은 파라미터

식 (1)에 있는 미분함수 f 는 사건으로부터 상수값을 유지하는 z 와 λ 가 포함되어 있으며 $\dot{x} = f(x, y)$ 형태로 구성된

함수이다. 마찬가지로, 식 (4)에 있는 리셋 함수 h_j 는 리셋 사건에서 x 와 λ 가 상수값을 유지하는 것을 나타낸다. 그러나 동적 변수 z 는 $z^+ = h_j(x^-, y^-)$ (x^+ 는 x 의 사건 이후의 값을 나타내며, x^- 와 y^- 는 x 와 y 의 사건 이전의 값을 나타낸다) 함수에 따라서 새로운 값으로 변화가 된다. 식 (2)에서, g 함수는 식 (3)의 y_d 의 부호에 따라 $g^{(i-)}$ 에서 $g^{(i+)}$ 로 변화하는 함수로서 시스템이 동작하는 과정에서 y_d 의 부호가 변할 때, 이산적인 스위칭 현상이 발생하는 조건이 되는 함수이다.

그리고 위와 같은 특성에 따라 시스템의 흐름도 (system flows) ϕ 는 다음과 같이 정의된다. 시스템의 흐름도는 앞서 설명한 x (선형 및 비선형 상태변수를 포함하는 변수)와 y 를 통해서 나타내고자 하는 함수를 의미한다.

$$\phi(x_0, t) = \begin{bmatrix} \phi_x(x_0, t) \\ \phi_y(x_0, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix}. \tag{5}$$

DAIS 모델에 대한 더욱 일반적이고 세세한 설명과 수치적 함수는 하이브리드 시스템에 대한 예제를 통해서 [7]에 설명되어 있다. DAIS 구조를 통한 하이브리드시스템 모델링은 시스템 전체의 변수에 대한 고유치를 구하는데 효과적이다. 식 (1)~(3)을 통해 구현된 전력시스템 모델링은 f, g 함수에 대한 비선형 및 선형 변수의 1차 편미분을 제공해 줌으로서 다음 식 (6)을 통해 시스템 전반에 대한 고유치를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x} &= \underline{f}_x \cdot \Delta x + \underline{f}_y \cdot \Delta y, \\ 0 &= \underline{g}_x \cdot \Delta x + \underline{g}_y \cdot \Delta y, \\ \Delta y &= -\underline{g}_y^{-1} \cdot \underline{g}_x \cdot \Delta x, \quad \Delta \dot{x} = (\underline{f}_x - \underline{f}_y \cdot \underline{g}_y^{-1} \cdot \underline{g}_x) \cdot \Delta x = \mathbf{A} \cdot \Delta x \end{aligned} \tag{6}$$

여기서, \mathbf{A} 는 변수벡터 x 에 대한 전체 시스템을 나타내는 행렬로서, 그 행렬의 고유치가 실제 시스템에 대한 고유치를 대표하게 된다.

3.2 하이브리드시스템 기법을 통한 전력시스템 모델링

PSS와 전압조정기/여자기를 포함한 전력계통을 식 (1)~(4)를 이용하여 DAIS 구조의 하이브리드 시스템으로 모델링을 수행한다. 그 중에 식 (7)~(9)는 그림 2에서 PSS의 선형제어기와 출력리미터를 하이브리드시스템으로 모델링한 수식을 의미한다. 시스템에 동작범위가 크게 변하거나 외란이 가해졌을 때, 각각의 제어기에는 입력($\Delta w, \Delta P$ 와 V_t)의 큰 변화 때문에 선형제어기의 출력값(그림 2의 V_{out})은 출력리미터의 상하한 값에 따라 제한된다. 이 때, 비선형의 이산 사건이 발생하게 되며, 하이브리드 시스템 모델링 하에서 식 (7)~(9)에서와 같이 각 조건에 해당하는 신호를 출력하게 되어 선형 및 비선형 특성이 포함된 시스템을 이산사건이 발생하거나 하지 않는 경우에도 일관되게 모델링할 수 있다. 식 (7)~(9)에 표현된 변수들은 그림 2에 모두 표시되어 있으며, 그림 2에 대한 설명을 참고하기 바란다.

$$f = \begin{cases} \dot{x}_L = \frac{1}{T_L}(\Delta w - x_L) \\ \dot{x}_w = v_w / T_w \\ \dot{x}_p = T_2 v_p - T_1 v_w \\ \dot{x}_k = T_4 v_{out} - T_3 v_k \end{cases} \quad (7)$$

$$g = \begin{cases} \Delta w K_1 - v_w - x_w \\ T_2 v_p - T_1 v_w - x_p \\ T_4 v_{out} - T_3 v_p - x_k \end{cases} \quad (8)$$

$$y_1 = V_{max} - V_{out};$$

$$y_2 = V_{out} - V_{min};$$

$$0 = \begin{cases} g_1^{(i-)}(x, y) = V_{PSS} - V_{max} & y_1 < 0, \\ g_1^{(i-)}(x, y) = V_{PSS} - V_{min} & y_2 < 0, \\ g_1^{(i+)}(x, y) = g_2^{(i+)}(x, y) = V_{PSS} - V_{out} & y_1 > 0, y_2 > 0. \end{cases} \quad (9)$$

4. PSS 정수 선정 기법

4.1 기존 방법에 의한 정수 선정

2.2절에서 언급한 PSS 정수 선정 방식은 TSAT 소프트웨어를 사용하여 2.2절에서 설명한 절차를 따라 수행한다. 본 논문에서 제시한 방법과 기존의 방법을 비교하기 위해서는 기존의 방법을 그대로 수행하여 비교를 수행해야 하지만, 본 연구진은 TSAT 소프트웨어를 보유하고 있지 않아 본 논문에서는 기존의 방법을 하이브리드시스템 모델링 기법을 이용하여 절차대로 수행하는 것으로 대신한다. 비록 TSAT 소프트웨어를 사용하지는 않지만, 비선형모델링 기반 하이브리드시스템 기법으로 1기 무한모션을 모델링하여 같은 절차를 따르는 것이므로 그 결과에 대해서는 기존의 방법보다 더욱 정확할 것으로 판단된다.

절차 1에 의하면, 위상보상 정수를 선정하기 위해서 $T_1/T_2 = T_3/T_4 = 10$ 을 유지하면서 기존의 진동모드에서 위상지연이 없도록 선정한다. 표 1은 하이브리드시스템 모델링을 통해서 위와 같은 조건을 만족시키는 위상보상 정수를 선정된 결과이다. 표 1에서와 같이 T_1/T_2 과 T_3/T_4 의 비율은 10을 유지하는 것을 확인할 수 있으며, 고유치의 허수부분이 거의 같은 값을 가지므로 PSS가 없을 때와 있을 때의 진동 고유주파수도 같은 것을 확인할 수 있다. 또한, PSS가 없을 때의 고유치는 $-0.27 \pm j6.75$ 로서 실수 부분이 -0.27 을 갖게 되며 위상보상 정수를 튜닝한 이후 고유치의 실수부분이 음의 방향으로 더 큰 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 저주파 진동에 대한 감쇠 정수가 더욱 크다는 것을 확인할 수가 있다.

표 1 기존 방법에 의한 PSS의 정수 선정결과

Table 1 Parameter selection results of the PSS based on existing method

K_1	T_1	T_2	T_3	T_4	고유치
9	0.25	0.025	0.3	0.03	$-1.01 \pm j6.70$

그림 3은 발전기 단자전압을 3% 상향시켰을 때, PSS가 없을 때와 기존의 방법으로 구한 PSS 정수를 적용했을 때의 저주파 진동 감쇠 성능을 보여주는 그래프이다. 그림에

서 볼 수 있는 것과 같이 기존의 방법으로 선정된 PSS의 적용은 외란에 대해서 저주파 진동을 감쇠시키는 성능을 보이는 것을 확인할 수 있으며, PSS의 적용에 따라서 저주파 진동의 고유 진동주파수가 변화하지 않는 것을 확인할 수 있다.

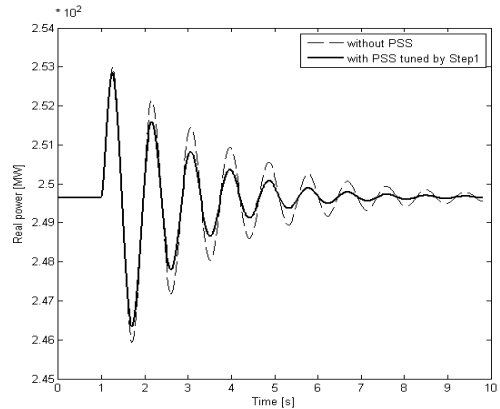


그림 3 위상 정수 선정에 따른 발전기 출력 응답
Fig. 3 Real power response of generator with tuned PSS by step 1

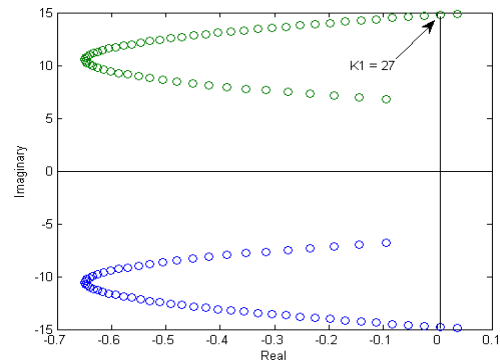


그림 4 이득 증가에 따른 고유치 궤적
Fig. 4 Root locus plot according to increment of gain value

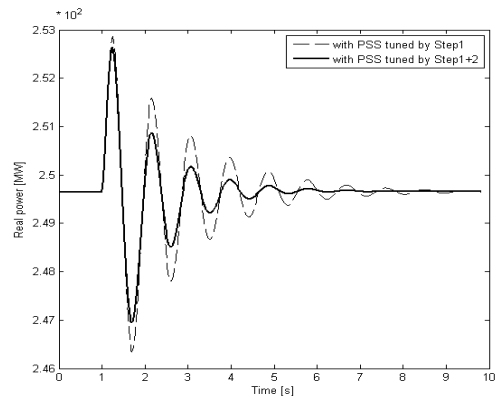


그림 5 위상 및 이득정수 선정에 따른 발전기 출력 응답
Fig. 5 Real power response of the generator with tuned PSS by step 1 and 2

또한, 절차 2에 따르면, 절차 1에서 구한 위상보상 정수를 이용하고, 이득정수를 점차 증가시켜 시스템이 불안정해지는 임계정수를 찾게 된다. 그림 4는 이득정수 증가에 따라 극점의 변화를 보여주고 있으며, K_1 이 27일 때 시스템이 불안정해지기 시작하는 것을 확인할 수 있다. 최종적으로 임계값의 1/3배가 되는 값을 이득정수로 선정하게 되며 이에 해당하는 값도 표 1에 함께 주어져 있다. 그림 5는 최종적으로 선정된 파라미터를 적용했을 때의 응답특성을 보여주고 있다. 그림 3에서와 같이 발전기 단자전압을 3% 상향시켰을 때의 응답특성을 나타내고 있으며, 그림 4에서와 같이 선정된 이득정수를 적용했을 때 댐핑 감쇠가 가장 큰 것을 확인할 수 있다.

4.2 하이브리드시스템 모델링 기반 정수 선정

전력시스템 적용을 위한 하이브리드시스템 모델링 기술은 2.2절에 설명한 것과 같이 미분방정식, 대수방정식, 임펄스-스위치를 나타내는 방정식으로 구분할 수가 있다. 미분방정식에서 뿐 만 아니라 임펄스-스위치를 나타내는 방정식을 표현함에 있어서 전력시스템의 비선형성을 그대로 적용하여 모델링을 수행하여 모의 결과가 정확하다는 장점을 가지고 있다.

하이브리드시스템 모델링을 통해 PSS의 정수선정을 위해서는 우선, 식 (1)~(4)를 이용하여 발전기, 송전선로, PSS를 포함한 모든 제어기를 DAIS 구조로 분석하게 된다. 그림 1의 전력시스템은 DAIS 구조를 통해 수학적식 모두 분석이 되므로 변수 x 및 y 에 대한 편미분을 구할 수 있다. 이와 같은 편미분값을 포함하여 식 (6)에서와 같이 미분방정식, 대수방정식의 조합을 통해 시스템 행렬 A 를 계산할 수 있으며, 식 (6)에서 행렬 A 를 포함한 마지막 수식은 전력시스템의 모든 특성을 가지고 있는 특성방정식을 나타낸다. 특성방정식을 분석하면 저주파 진동에 관련된 고유치를 계산할 수 있으며, 본 논문에서 제안하는 바와 같이 기존의 진동주파수를 유지하면서 가장 큰 감쇠 정수를 갖도록 하는 PSS의 정수를 선택할 수 있다.

그림 6는 PSS 정수 변화에 따른 저주파 진동에 해당하는 고유치의 분포를 나타내고 있다. 그림에서 검정색 실선은

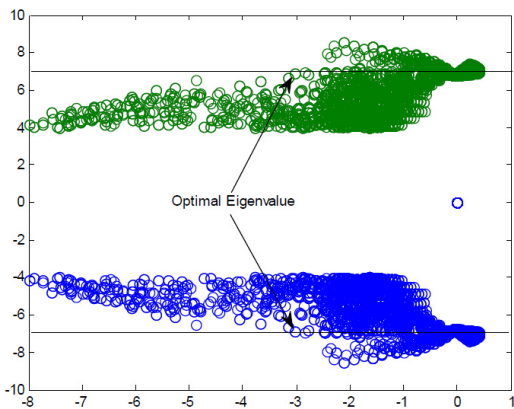


그림 6 PSS 정수 변화에 따른 고유치 분포
Fig. 6 Eigenvalue distribution according to variation of PSS parameters

기존의 진동 주파수를 의미하며, 검정색 선위의 고유치를 갖는 PSS 정수를 선정한다면 기존의 진동주파수를 유지할 수 있다. 따라서 기존의 진동주파수를 유지하고 가장 큰 감쇠정수를 갖는 PSS의 정수를 선정한다면, 기존의 2단계 절차에서 선정한 결과보다 성능이 좋은 PSS 정수를 선정할 수 있다.

5. 모의 결과

그림 6에서와 같이 하이브리드시스템 모델링을 통해 고유치분석을 수행하여, 기존 진동주파수와 주파수는 거의 같으며 감쇠정수가 큰 고유치를 찾아낼 수가 있으며, 그에 해당하는 파라미터를 구할 수가 있다. 이와 같은 방법은 기존의 방법인 위상정수 선정 및 이득정수 선정기법의 단점을 극복하고 보다 안정된 PSS 정수를 선정할 수 있다는 장점이 있다. 표 2는 본 논문에서 제시하는 방법으로 선정된 PSS 정수이다. 표에서 보는 것과 같이 이득 정수가 기존 방법보다 크지 않아도 고유치의 실수부분이 음의 방향으로 크므로 더 큰 감쇠정수를 갖는 것을 확인할 수 있다.

표 2 PSS의 정수 선정결과 비교

Table 2 Comparison of Parameter selection results of PSS

PSS 정수	K_1	T_1	T_2	T_3	T_4	고유치
기존방법	9	0.25	0.025	0.3	0.03	-1.01±j6.70
제안방법	4	0.5	0.05	0.95	0.15	-3.03±j6.87

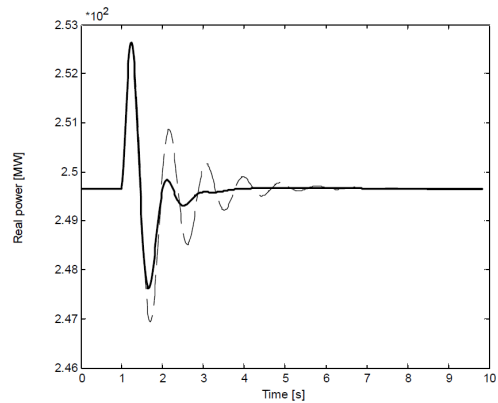


그림 7 단자전압 변경에 따른 발전기 출력 응답
Fig. 7 AVR 3% step response of generator output

제안한 방법으로 선정된 파라미터의 효과를 분석하기 위해 2가지 모의를 수행하였다. 첫 번째는 앞서 수행한 것과 같은 발전기 단자전압을 3%정도 상향시키는 모의에 대한 응답을 확인하는 것이며, 두 번째는 모의시간 1초에 발전기 모선에 0.05초 동안 3상 사고를 인가하였을 때의 응답특성을 확인하는 것이다. 그림 7은 단자전압 3%를 상향시켰을 때의 발전기 출력 응답특성이며, 그림 8은 3상 사고를 인가했을 때의 발전기 출력 응답특성을 보여준다. 그림 7과 8에서 확인할 수 있는 것과 같이 제안된 방법으로 선정된 PSS 정수는 기존의 진동 주파수를 유지하면서도 다양한 외란에 대해서 큰 감쇠특성을 보이는 것을 확인할 수 있다.

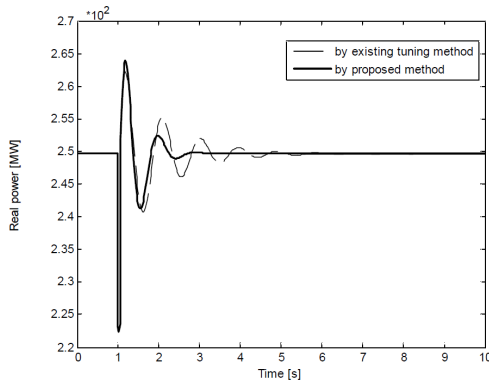


그림 8 삼상사고에 따른 발전기 출력 응답
 Fig. 8 Real power response of the generator after three phase terminal bus fault

6. 결 론

본 논문은 기존의 전력시스템 안정화 장치(Power System Stabilize, 이하 PSS) 정수선정 기법의 단점을 극복하고, 계통의 안정도를 향상시키기 위해 하이브리드시스템 모델링 기술에 의한 PSS 정수 선정 기법을 제안하였다. 기존의 PSS 정수선정 기법으로 PSS의 위상보상기의 정수를 선정하기 위해서는 보테선도를 사용하여 위상지연이 되지 않도록 하는 정수를 선정하며, 이득 정수는 근 계적법을 분석하여 최적값을 선정하는 방법을 사용하고 있다. 이와 같은 방법의 단점은 위상보상기의 정수비를 고정하고 정수를 찾게 되어 최적값을 구하기 어렵다는 것과 위상보상기의 정수를 구한 후, 고유치를 분석하여 이득 정수를 구하므로 위상보상기의 정수와 이득정수에 대한 최적값을 동시에 찾을 수 없다는 것이다.

본 논문에서는 전력시스템의 하이브리드시스템 모델링에 적합한 DAIS(differential-algebraic-impulsive-switched) 구조의 하이브리드 시스템 모델링 기술을 적용하여 PSS의 선형파라미터를 선정하기 위해 적용하였으며, 다양한 외란에 대해서 그 성능을 검증하여 본 논문에서 제안하는 방법이 기존의 정수 선정기법보다 안정도 향상에 기여하는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 방법으로 선정된 PSS 파라미터는 실제 전력시스템에 적용하여도 좋은 성능을 보일 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 공주대학교 신입교수 정착연구비에 의하여 연구되었음.

References

[1] P. Kundur, M. Klein, G.J. Rogers, and M.S. Zywno, "Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability," IEEE Transactions on Power Systems, Vol.4, No.2, pp. 614-626, May 1989.

[2] M. Klein, G. J. Rogers, S. Moorty, and P. Kundur, "Analytical Investigation of Factors Influencing Power System Stabilizers Performance", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 7, No. 3, pp. 382-388, September 1992.

[3] J-H Shin, J-G Lee, S-C Nam, Y-D Choy, and T-K Kim, "A Tuning Method for the Power System Stabilizer of a Large Thermal Power Plant and its Application to Real Power System : Part I - Selection of Parameters by Off-line Simulation", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol.23, no.12, pp.191~200, December, 2009.

[4] J-H Shin, S-C Nam, S-M Baek, J-Y Song, J-G Lee, and T-K Kim, "A Tuning Method for the Power System Stabilizer of a Large Thermal Power Plant and its Application to Real Power System : Part II - Field Tests and Verification of PSS Performance", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol.25, no.8, pp.114~121, August, 2011.

[5] A. van der Schaft and H. Schumacher, An Introduction to Hybrid Dynamical Systems, Springer-Verlag, London, 2000.

[6] D. Liberzon, Switching in Systems and Control, Birkhauser, Boston, 2003.

[7] Ian A. Hiskens and M. A. Pai, "Trajectory Sensitivity Analysis of Hybrid Systems", IEEE Transactions on Circuits and Systems-Part I: Fundamental Theory and Applications, Vol.47, No.2, pp. 204-220, February 2000.

[8] N. Martins and L. T. G. Lima, "Determination of Suitable Locations for Power System Stabilizers and Static VAR Compensators for Damping Electromechanical Oscillations in Large Scale Power Systems", in Proceeding of Power Industry Computer Application, pp.74-82, May 1989.

[9] Prabha Kundur, Power system stability and Control, EPRI Editors, McGraw-Hill, Inc. ISBN 0-07-035958-X, 1993.

[10] P. W Sauer and M. A Pai, Power System Dynamics and Stability. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Wall, 1998.

[11] M. S. Branicky, V. S. Borkar, and S. K. Mitter, "A unified framework for hybrid control: Model and optimal control theory", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 43, pp. 31-45, January 1998.

저 자 소 개



백 승 묵 (白承默)

1979년 6월 6일생. 2006년 연세대 기계전자공학부 졸업. 2007년 연세대 전기전자공학부 졸업(석사). 2010년 동대학원 전기전자공학과 졸업(박사). 2009~2012년 한국전력공사 전력연구원 연구원. 2012년~현재 공주대학교 조교수.